

Article spécial

Gestion d'un accident de plongée en situation d'isolement.  
Intérêt de la recompression thérapeutique par immersion.  
Revue et proposition d'un nouveau protocole à l'occasion d'une mission  
sur l'atoll de Clipperton

Decompression sickness accident management in remote areas.  
Use of immediate in-water recompression therapy.  
Review and elaboration of a new protocol targeted  
for a mission at Clipperton atoll

J.-E. Blatteau <sup>a,\*</sup>, F. Jean <sup>c</sup>, J.-M. Pontier <sup>a</sup>, E. Blanche <sup>b</sup>, J.-M. Bompar <sup>c</sup>,  
E. Meaudre <sup>d</sup>, J.-L. Étienne <sup>e</sup>

<sup>a</sup> *Département de médecine hyperbare, hôpital d'instruction des armées Sainte-Anne, 83800 Toulon Armées, France*

<sup>b</sup> *CHIC Castres-Mazamet, 81200 Mazamet, France*

<sup>c</sup> *Clinique Saint-Jean, 83000 Toulon, France*

<sup>d</sup> *Département d'anesthésie-réanimation, hôpital d'instruction des armées Sainte-Anne, 83800 Toulon Armées, France*

<sup>e</sup> *Société Septième Continent, 21 bis, rue du Simplon, 75018 Paris, France*

Reçu le 17 octobre 2005 ; accepté le 11 avril 2006

Disponible sur internet le 21 juillet 2006

---

Résumé

La recompression thérapeutique par immersion se définit comme une possibilité de traitement d'un accident de décompression par la pratique d'un retour sous l'eau du plongeur accidenté dès l'apparition de la symptomatologie, dans des endroits isolés et éloignés de toute structure hyperbare. Au moins trois méthodes de réimmersion ont été publiées. Elles prescrivent l'emploi de l'oxygène pur pour de longues durées à la profondeur de 9 m. L'efficacité de la recompression thérapeutique par immersion vis-à-vis de la recompression en chambre hyperbare n'a jamais été documentée. Cette méthode devrait être utilisée, dans des endroits isolés, comme une mesure de secours visant à bloquer l'évolutivité de l'accident de décompression dans l'attente d'une évacuation secondaire vers un centre hyperbare. Les risques de noyade et d'hypothermie résultant des conditions environnementales sont les plus souvent cités, la respiration d'oxygène pur à 9 m expose également à la toxicité aiguë de l'oxygène. L'objectif de ce travail est de passer en revue les différentes méthodes publiées de recompression thérapeutique par immersion pour finalement en proposer une nouvelle. En effet, tous les protocoles publiés réimmergent le plongeur accidenté pour de longues périodes de temps. Pourtant la déshydratation liée à une longue période d'immersion peut aggraver les symptômes de la maladie de décompression et la toxicité aiguë de l'oxygène est également liée à la durée d'exposition. Dans le but de réduire ces risques, nous avons développé une nouvelle méthode de réimmersion, plus courte que celles décrites et spécialement conçue pour une mission d'exploration sous-marine sur l'atoll de Clipperton dans le Pacifique Nord.

© 2006 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [je.blatteau@infonie.fr](mailto:je.blatteau@infonie.fr) (J.-E. Blatteau).

## Abstract

In-Water Recompression (IWR) is defined as a treatment of decompression sickness by immediate underwater recompression after the onset of symptoms in remote areas where hyperbaric chambers are not available. At least three methods of IWR have been published. They used pure oxygen breathing for prolonged periods of time at a depth of 9 m. IWR effectiveness in comparison with standard recompression techniques has not been assessed. IWR should be used in remote localities as an immediate measure to stop the evolution of decompression illness before evacuating the victim for subsequent treatment to the nearest hyperbaric facility. Resulting from environmental conditions, the risks of drowning and hypothermia are the most often quoted, pure oxygen breathing at 9 m can also expose to acute oxygen toxicity. The objectives of this work are: first, to examine existing published methods of IWR; second, to propose a new method of IWR. All published methods of IWR involve victim returning underwater for a long period of time. But dehydration due to a long period of immersion can worsen symptoms of decompression illness and acute oxygen toxicity is also related to the duration of the exposition. In response to these considerations we developed a shorter method of conducting IWR specifically targeted for a diving mission at Clipperton atoll in the Northern Pacific Ocean.

© 2006 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots clés* : Plongée ; Accident de décompression ; Recompression thérapeutique par immersion ; Déshydratation ; Hypothermie ; Toxicité de l'oxygène

*Keywords*: Diving; Decompression sickness; In water recompression; Dehydration; Hypothermia; Oxygen toxicity

## 1. Introduction

L'étude de la pratique de la plongée à l'air chez les plongeurs pêcheurs de coquillages originaires d'Hawaï ou d'Australie a montré que lorsque ceux-ci étaient victimes d'accident de désaturation (ADD) — n'ayant pas la possibilité d'être évacués vers un centre hyperbare — ils se réimmergeaient immédiatement après l'apparition des premiers signes jusqu'à une profondeur où les symptômes disparaissaient. D'après les rares études disponibles, cette « méthode » aurait donné d'excellents résultats et fort peu de séquelles [1]. Ces pratiques individuelles et empiriques ont inspiré des procédures codifiées de recompression thérapeutique par immersion (RTI), utilisant de l'oxygène, et applicables à la plongée professionnelle en situation d'isolement, c'est-à-dire sans possibilité de recompression thérapeutique en chambre hyperbare.

Les méthodes publiées de RTI sont de trois types :

- immersion peu profonde à l'oxygène, remontée linéaire lente (méthode « australienne » [2]) ;
- immersion avec incursion à grande profondeur (méthode « hawaïenne » [1,3]) ;
- immersion à faible profondeur avec remontée par paliers (méthode de l'US Navy [4]).

Elles s'adressent avant tout aux plongeurs disposant de la capacité de se réimmerger en respirant de l'oxygène pur et sans possibilité de recompression thérapeutique en caisson dans des délais raisonnables.

Le bénéfice de la RTI s'expliquerait d'une part par l'effet pressurisé immédiat de l'immersion (compression sans délais des bulles à l'origine de l'accident de plongée), et par les effets propres de l'hyperoxie. Malgré ses avantages potentiels (simplicité, absence d'infrastructure, délai court), la RTI n'est pas recommandée et peu de manuels consacrés à la plongée professionnelle en font une description précise.

L'objectif de ce travail est de passer en revue les différentes méthodes de RTI, les avantages et les indications éventuelles disponibles dans la littérature médicale, puis de décrire une

méthode de RTI utilisée dans le cadre d'une mission en situation d'isolement sur l'atoll français de Clipperton, dans le Pacifique Nord Est.

## 2. Maladie de décompression, bases de la RTI

### 2.1. Physiopathologie

Le processus déclencheur initial de l'accident de désaturation est le phénomène bullaire apparaissant lors de la décompression. Il est secondaire à la sursaturation des tissus chargés en gaz diluant (l'azote pour la plongée à l'air). Les bulles provoquent des phénomènes d'occlusion microvasculaire et des lésions endothéliales avec activation de la coagulation et de l'inflammation. Ces phénomènes déclenchent une maladie qui évolue pour son propre compte alors que l'exposition à l'hyperbarie a disparu. On parle de maladie de décompression (MDD). L'aspect clinique varie selon les territoires concernés par le processus pathologique : système nerveux, os, peau...

Le bénéfice de la RTI peut être lié à l'effet immédiat de la pression qui va comprimer les bulles issues de la décompression et neutraliser l'accident au stade de l'accident bullaire initial. La maladie de décompression ne s'enclenche pas, il n'y a pas de lésion endothéliale. La respiration d'oxygène pur associée à la RTI peut avoir son propre effet (l'hyperoxie), et favoriser l'élimination du gaz diluant l'oxygène.

### 2.2. Maladie de décompression, aspects cliniques

Il est classique de classer et de décrire les divers ADD selon leur gravité. On distingue les accidents « bénins » ou de type 1 des accidents « sévères » ou de type 2.

Les accidents de type 1 regroupent les accidents cutanés et les accidents ostéomyoarticulaires. Les accidents de type 2 regroupent les accidents neurologiques (médullaires, cochléovestibulaires, cérébraux), et plus rarement les accidents pulmonaires, les accidents cardiaques, et les manifestations générales. Les plus fréquents et les plus graves sont les accidents neurologiques (environ 70 % des cas).

Les indications de la RTI restent assez imprécises dans la littérature. Elles seraient superposables à celle du traitement hyperbare en chambre thérapeutique c'est-à-dire incluant les accidents de désaturation de type 1, de localisation ostéo-myocardiaire, et les accidents de type 2, de localisations cochléovestibulaires et neurologiques ainsi que les barotraumatismes pulmonaires avec aéroembolisme cérébral.

La procédure US Navy [4] différencie les accidents de type 1 (ostéo-myocardiaux) et de type 2 (cochléovestibulaires et neurologiques) avec une durée de réimmersion plus longue pour ces derniers. Tous les protocoles prévoient des durées de réimmersion majorées en cas de persistance ou d'aggravation des symptômes (en particulier pour les accidents médullaires). Les procédures avec incursions prévoient également des incursions plus profondes en cas de non-résolution des signes [1,3].

Si certains ne recommandent pas la RTI pour les patients qui convulsent ou qui ont des troubles de conscience [2], d'autres estiment que ces patients pourraient avoir un bénéfice direct à être réimmergés dans des conditions de sécurité « contrôlées » c'est-à-dire avec l'emploi d'un masque facial [5], ce qui semble assez discutable.

### 2.3. Maladie de décompression, traitement

Le délai de recompression est un facteur pronostique : l'échec de la thérapie hyperbare s'explique souvent par un délai d'accès au caisson trop long pour les accidents déjà au stade de maladie de la décompression [6]. Une étude sur 900 ADD de plongeurs de l'US Navy constate 91,4 % de succès du traitement hyperbare s'il est réalisé dans les 15 minutes après le début des signes, mais en revanche une diminution de l'efficacité du traitement (85,7 %) si la prise en charge est réalisée dans les 12–24 heures [7]. En plongée de loisir, un rapport du Divers Alert Network (DAN) sur 394 ADD montre que 56 % des plongeurs victimes d'ADD avec des signes modérés récupèrent complètement s'ils sont traités dans les six heures, tandis que 26 % seulement récupèrent s'ils sont traités dans les 24 heures ; dans cette même étude 39 % des ADD sévères s'améliorent s'ils sont traités dans les six heures contre 26 % pris en charge dans les 24 heures [8]. Corrélé avec le délai de recompression, le taux de séquelles et particulièrement les séquelles graves, augmente significativement lorsque la recom-

pression est retardée [9]. A contrario la politique de recompression immédiate (avec des tables à 30 m) dans les minutes qui suivent l'apparition des signes telle que réalisée dans la Marine française permet d'observer 97 % d'évolution favorable sur l'ensemble des accidents traités sur une période de 12 ans [10].

La RTI a tout d'abord été envisagée uniquement dans le cas où l'évacuation vers un centre hyperbare n'était pas réalisable. Par la suite cette indication a été élargie à la situation où l'arrivée du moyen d'évacuation excède trois heures [2] ou bien la situation où le délai d'accès à un centre hyperbare est d'au moins six heures [11]. Les moyens d'évacuation et donc le délai d'accès vers un centre hyperbare doivent être recherchés et identifiés à la phase de préparation des opérations de plongée ; si la RTI est retenue, il est impératif de la réaliser précocement, c'est-à-dire si possible dans les premières minutes qui suivent l'apparition des symptômes [2]. Dans tous les cas l'évacuation secondaire après la RTI vers un centre hyperbare doit être programmée.

## 3. RTI, analyse de la littérature

### 3.1. Protocoles publiés de RTI

#### 3.1.1. La méthode « australienne » (Fig. 1), avec remontée linéaire lente [2]

Le plongeur accidenté assisté du plongeur d'assistance descend jusqu'à neuf mètres à l'O<sub>2</sub> pur.

Ce palier dure de 30 minutes dans les accidents mineurs à 60 minutes dans les cas plus graves. Si les symptômes ne disparaissent pas au bout de ces périodes, on peut les rallonger de 30 minutes chacune. Dans tous les cas au bout de 90 minutes, la remontée s'effectue à une vitesse très lente d'un mètre toutes les 12 minutes.

Si les signes réapparaissent pendant la remontée, il faut rester 30 minutes de plus à la profondeur d'apparition des signes et reprendre ensuite la remontée. La durée totale de cette procédure peut varier de deux heures et 36 minutes à trois heures et six minutes. En surface le patient doit être maintenu sous oxygène normobare pendant 12 heures au moins en alternant une heure d'oxygène pour une heure à l'air.

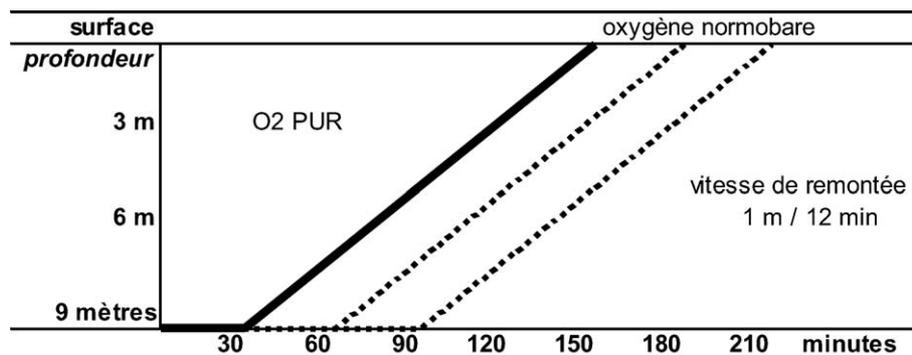


Fig. 1. Méthode de recompression thérapeutique par immersion « australienne », à la profondeur maximale de neuf mètres sous oxygène pur (30, 60 ou 90 minutes) avec remontée linéaire lente.

3.1.2. La méthode de l'US Navy (Fig. 2), avec remontée par paliers [4]

Le plongeur accidenté et le plongeur accompagnant descendent à neuf mètres à l'O<sub>2</sub> pur, et y restent de 60 minutes pour les accidents de type 1 à 90 minutes pour les accidents de type 2.

De toute façon, au bout de 90 minutes, il faut amorcer la remontée jusqu'à six mètres, même si les signes n'ont pas complètement disparu. Ce palier dure 60 minutes et il est reproduit à trois mètres pour une durée également de 60 minutes. La durée totale varie de 180 à 210 minutes. En surface, l'accidenté doit respirer de l'O<sub>2</sub> pur pendant trois heures.

3.1.3. La méthode « hawaïenne » (Fig. 3), avec incursion profonde [1]

La victime et le plongeur d'assistance descendent à l'air neuf mètres en dessous de la profondeur à laquelle les symptômes ont disparu sans jamais dépasser 50 m. Ils y restent dix minutes : cette incursion plus profonde est réalisée à l'air. La remontée est ensuite pratiquée avec une vitesse décroissante de 9 à 1,5 m par minute.

Si les signes réapparaissent à la remontée, il faut redescendre de 3 m et y rester cinq minutes puis reprendre la remontée jusqu'à 9 m. Au palier à 9 m, la victime passe sur l'oxygène pur et y reste au minimum une heure. Si les symptômes persistent, on peut rallonger la durée du palier de 9 m à l'O<sub>2</sub> par tranche de 30 minutes sans dépasser trois heures en totalité ; la remontée jusqu'à la surface s'effectue à la vitesse d'un mètre par minute. En surface, il faut poursuivre l'oxygène pur jusqu'à l'arrivée des transports pour l'évacuation vers un centre hyperbare.

3.1.4. La méthode « hawaïenne » (Fig. 4) revisitée [3]

La réimmersion n'est réalisée que si les symptômes persistent après dix minutes de respiration en surface d'oxygène 100 %. Dans ce cas, l'accidenté est immergé à 7,5 m sous oxygène pur. Après au moins dix minutes à cette profondeur et en cas de persistance des signes, une incursion profonde est possible à l'air ou mieux avec un mélange suroxygéné.

Si les symptômes disparaissent au cours des deux premières minutes de l'incursion, il faut rester encore huit minutes pour une durée totale de dix minutes pour l'incursion. La première

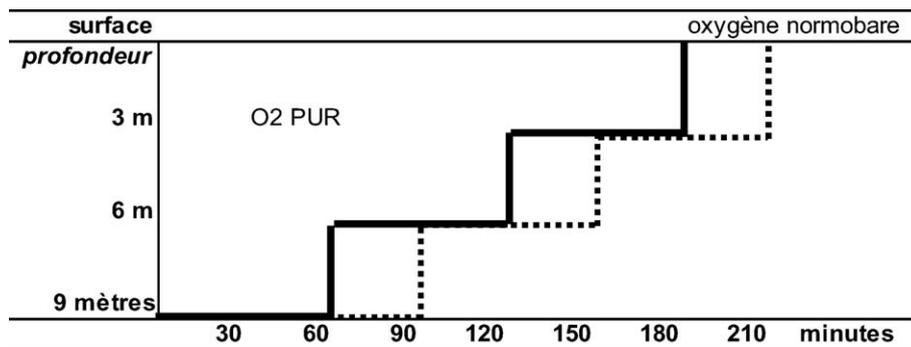


Fig. 2. Méthode de recompression thérapeutique par immersion de l'US Navy, à la profondeur maximale de neuf mètres sous oxygène pur (60 ou 90 minutes) avec remontée par paliers.

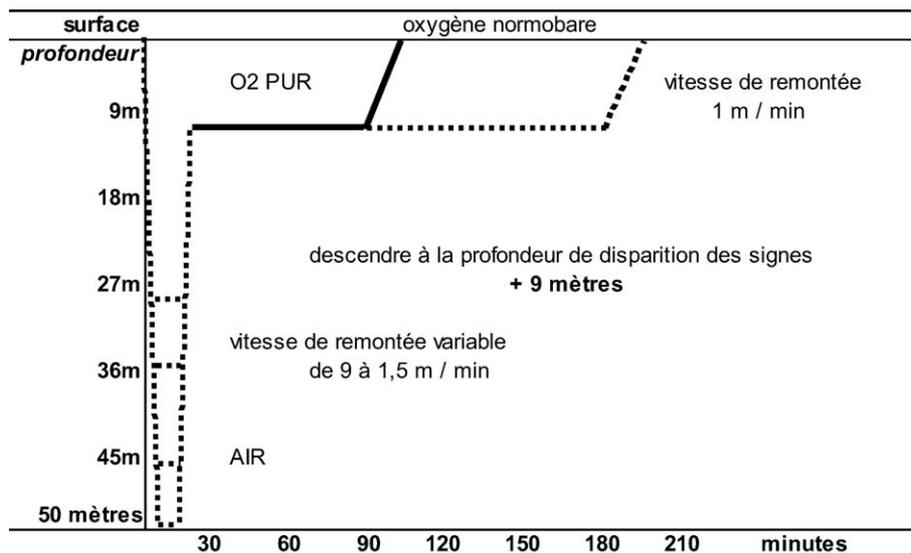


Fig. 3. Méthode « hawaïenne » de recompression thérapeutique par immersion avec incursions profondes à l'air, suivies d'un palier à la profondeur de 9 m sous oxygène pur.

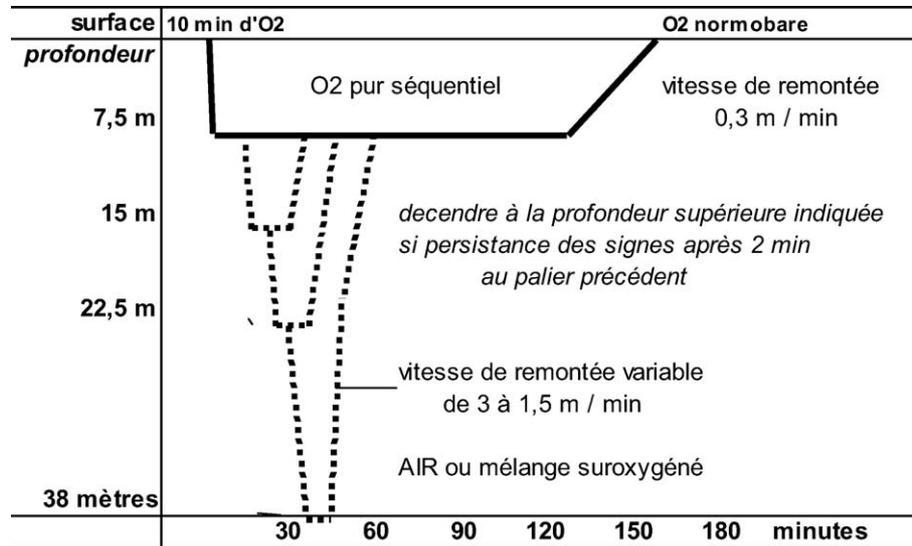


Fig. 4. Méthode « hawaïenne-bis » de recompression thérapeutique par immersion avec incursions profondes à l'air ou au mélange suroxygéné, suivies d'un palier à la profondeur de 7,5 m sous oxygène pur.

incursion est fixée à 15 m mais il est possible de réaliser deux incursions plus profondes (à 22,5 et 38 m) en cas de persistance des signes. La remontée s'effectue directement à 7,5 m à la vitesse de 3 m/min entre 38 et 15 m et de 1,5 m/min entre 15 et 7,5 m. La remontée de 7,5 m à la surface s'effectue à 0,3 m/min avec une durée totale du protocole de deux heures et cinq minutes.

Contrairement aux autres protocoles, l'oxygène 100 % est donné en mode séquentiel à 7,5 m en alternant 20 minutes d'O<sub>2</sub> pour cinq minutes d'air.

En surface, l'accidenté est placé sous 100 % d'O<sub>2</sub> pendant trois heures.

### 3.2. Résultats

Une étude sur 527 plongeurs pêcheurs hawaïens ayant réalisé des réimmersions à l'air, sans protocole précis, fait état d'excellents résultats avec une résolution complète des symptômes pour 462 plongeurs (88 %), 51 cas (10 %) avec des symptômes résiduels légers, sans traitement complémentaire et seulement 14 cas (2,6 %) de patients avec des symptômes persistants ayant nécessité des traitements complémentaires ; aucun plongeur ne s'est aggravé après la réimmersion [1]. Il s'agit cependant d'une étude rétrospective, avec plusieurs protocoles de RTI, des présentations cliniques initiales diverses, et sans forme grave.

Une autre étude hawaïenne sur 86 plongeurs ayant réalisé essentiellement des réimmersions à l'air semble confirmer les résultats précédents avec près de 60 % de plongeurs devenant asymptomatiques après la réimmersion, 30 % améliorant leurs symptômes et seulement quelques cas isolés d'aggravation [5].

Plusieurs cas cliniques ont été rapportés et regroupés : il faut noter sur l'ensemble de ces observations la rareté de réalisation des protocoles de RTI selon une des méthodes publiées, même quand cela était techniquement possible. Deux observations

montrent malgré tout l'efficacité de la RTI réalisée tardivement avec un protocole de type australien dans les deux cas [5].

Une de ces observations fait état d'un accident de désaturation médullaire avec paraplégie, évacué sous oxygène normobare sans aucune amélioration. La récupération motrice survient de façon spectaculaire après une séance de RTI réalisée 36 heures après le début des signes [12].

Les cas rapportés correspondent souvent à des décompressions incomplètes après des plongées saturantes liées soit à des problèmes techniques soit à des mauvaises rencontres (comme des requins tigres) : les plongeurs remontent rapidement en surface en prévoyant de se réimmerger pour terminer leur décompression mais entre-temps des signes d'accidents de décompression le plus souvent de type neurologique apparaissent. La réimmersion thérapeutique est en général entreprise à l'air de façon totalement empirique avec des incursions dans la zone 20 à 30 m suivies de longs paliers à six ou trois mètres, ou alors avec de l'oxygène pur, quand il est disponible, pour réaliser des paliers peu profonds (en général à six mètres). Dans ces observations tous les plongeurs récupèrent presque complètement.

## 4. RTI, contraintes, risques et solutions retenues

### 4.1. Environnement requis

#### 4.1.1. Matériel

Il n'est pas spécifique, mais il demande une installation rigoureuse pour être utilisé le plus rapidement possible en cas d'accident de décompression. Sont requis :

- des réserves d'oxygène suffisantes et des tuyaux souples suffisamment longs (par exemple pour une réimmersion à 9 m, il est recommandé d'avoir des tuyaux souples d'au moins 12 m). L'oxygène pur peut être délivré à partir d'un

appareil à recyclage de gaz (comme cela est d'ailleurs prévu dans le protocole de l'US Navy) [4], à condition qu'il délivre une pression inspirée d'oxygène ( $PiO_2$ ) équivalente à un dispositif « ouvert » et surtout que le sujet accidenté soit habitué à l'utilisation de ce type d'appareil ;

- un masque facial qui permet d'utiliser un moyen de communication entre l'accidenté, l'accompagnant et la surface. Il offre par ailleurs un plus grand confort respiratoire qu'un simple détendeur en bouche pendant plusieurs heures. Et surtout en cas de perte de connaissance ou de crise d'hyperoxie, il évite la noyade. En revanche, en cas de vomissements, son retrait prive l'accidenté de son oxygénéateur ;
- une bonne protection contre l'hypothermie qui peut être assurée par une combinaison en néoprène ou une combinaison sèche, adaptée à la température de l'eau, munie d'une cagoule ;
- une ligne à paliers, marquée tous les mètres ;
- une ligne de vie raccordant l'accidenté à la surface est fortement recommandée ;
- un siège ou un harnais immergeable pour le confort de l'accidenté, qui permet aussi d'éviter l'épuisement en cas de signes déficitaires.

#### 4.1.2. Personnel

L'équipe comprend au minimum une personne en surface sur l'embarcation pour contrôler les réserves d' $O_2$ , le respect du protocole de réimmersion et les paramètres de plongée du ou des plongeurs accompagnants. Un, voire deux plongeurs d'assistance sont indispensables auprès de l'accidenté pour lui porter secours au moindre problème. Il faut qu'ils soient si possible « vierges » de toute saturation.

#### 4.1.3. Environnement naturel

La noyade est considérée comme un des risques les plus sérieux de la RTI. Elle peut résulter de causes environnementales comme l'état de la mer, les courants marins, ou tout simplement la perte de l'embarcation de surface. Une forte houle au palier peut entraîner une naupathie à l'origine de vomissements, voire un syndrome d'inhalation.

Les conditions météorologiques peuvent être en cause dans l'interruption du protocole (tempête, courants et houle violents, etc.). Il peut s'agir d'autres causes environnementales comme le cas d'une faune sous-marine agressive avec par exemple la présence de requins s'approchant dangereusement des plongeurs. L'interruption brutale de la RTI peut aggraver l'évolution de l'accident de désaturation.

#### 4.2. Immersion

Pour certains, le processus même d'immersion avec le contact direct de l'eau, au lieu de l'atmosphère sèche d'une chambre hyperbare, altérerait la capacité du plongeur à appréhender ses symptômes et leur évolutivité [5].

La déshydratation observée dans les accidents de désaturation découle pour une part importante de la maladie de décom-

pression et constitue un facteur pronostique (objectivé par l'hémoconcentration) des accidents de décompression neurologique. Elle s'explique par une augmentation de la perméabilité capillaire avec fuite plasmatique responsable d'hémoconcentration, d'augmentation de la viscosité et d'œdème [13].

L'immersion entraîne également un état d'hypovolémie. La pression hydrostatique entraîne une redistribution de la volémie au niveau central avec un état d'hypervolémie relative mettant en jeu des facteurs de régulation (peptides natriurétiques) visant à corriger ce signal. Ce processus engendre une hypovolémie qui sera donc d'autant plus importante que la durée d'immersion sera longue. La perte volémique a été chiffrée lors d'une étude sur dix plongeurs avec immersion complète de six heures dans de l'eau à 18 °C (en combinaison humide) : la variation du volume plasmatique était de -3,6 % après une heure, -11 % après trois heures et -14,3 % après six heures. Les pertes hydriques étaient principalement urinaires (1,8 l en moyenne) avec un débit urinaire plus élevé pendant la première partie de l'immersion [14].

Tant que dure l'immersion cet état d'hypovolémie est bien toléré, mais au retour à la pression atmosphérique, les territoires périphériques sont à nouveau perfusés normalement ce qui peut aboutir à un état de déshydratation symptomatique.

La durée d'immersion dans les protocoles de RTI est malheureusement un facteur qui n'a pas été pris en compte pour l'évolution de la maladie de décompression. Les longues durées d'immersion proposées de l'ordre de deux à trois heures sont très certainement péjoratives car elles aggravent la déshydratation initiée par la maladie de la décompression.

#### 4.3. Hypothermie

L'hypothermie est souvent considérée comme un des problèmes majeurs de la RTI. D'une part, la vasoconstriction périphérique liée au froid majore l'état d'hypervolémie centrale qui aboutit *in fine* à un état de déshydratation majoré (effet du froid et de l'immersion) ; d'autre part la vasoconstriction diminue la perfusion périphérique et donc réduit l'élimination de l'azote accumulé au cours de la plongée.

La limitation de l'indication de RTI aux seules régions tropicales avec mers chaudes semble excessive car l'on peut tout à fait envisager une procédure de RTI dans des mers tempérées si l'on dispose de combinaison ou de moyen de réchauffement adaptés à la température de la mer [2]. Une étude rapporte deux essais de RTI dans les conditions extrêmes de l'Antarctique (température de l'eau -1,4 °C), mais ce travail démontre aussi la difficulté à maintenir un niveau acceptable de température centrale après plusieurs heures de procédure [15]. L'étude de plongeurs statiques en immersion complète montre la possibilité de maintenir une température centrale correcte dans de l'eau à 10 °C pendant six heures avec une combinaison humide et sans moyen de réchauffement mais au prix d'un état de déshydratation important lié à l'effet conjugué du froid et de l'immersion [16].

#### 4.4. Respiration de gaz inerte

La méthode de RTI à l'air est jugée dangereuse : il n'existe pas de protocole défini, le plongeur peut être victime de narcose à l'azote en cas de réimmersion trop profonde, et surtout il va continuer à se saturer en azote pendant la phase de réimmersion ce qui est susceptible d'aggraver l'ADD.

Dans le cas des méthodes de RTI avec incursion profonde, il est préférable d'utiliser un mélange suroxygéné de type Nitrox ( $O_2-N_2$ ) ou HélioX ( $O_2-He$ ) qui permet de réduire l'apport de gaz inerte [3]. Le mélange peut être obtenu à partir d'un recycleur. Cependant, ces appareils à recyclage des gaz exposent à des risques propres car les variations importantes des pressions partielles des gaz inspirés peuvent donner lieu à des accidents biochimiques (hyperoxie, hypoxie, hypercapnie), responsables de perte de connaissance [17].

#### 4.5. Hyperoxie

Seules les procédures de RTI à l'oxygène ont été publiées et reconnues par certaines organisations ou manuels de plongée [18]. Elles limitent en effet les principaux risques cités précédemment mais exposent au risque de toxicité neurologique de l'oxygène avec la crise hyperoxique. Celle-ci réalise une véritable crise convulsive généralisée qui cède à la cessation de l'exposition à l'oxygène. La majorité des protocoles autorisent la respiration d'oxygène pur à la profondeur de 9 m soit une  $PiO_2$  de 1,9 ATA pendant deux à trois heures. Il s'agit d'un niveau d'hyperoxie moindre que celui généralement accepté pour des patients au repos en chambre hyperbare pendant de nombreuses heures (2,8 ATA) mais supérieur à celui accepté pour les plongeurs utilisant l'oxygène pur en eau en situation dynamique (1,6 ATA) [19]. Pour un patient réimmergé en position statique, le risque d'être victime d'une crise hyperoxique avec une  $PiO_2$  à 1,9 ATA est faible mais pas négligeable, d'autant plus que le risque augmente avec la durée d'exposition, situation rencontrée lorsque la RTI dure près de trois heures. Il existe en outre une grande variabilité inter- et intra-individuelle vis-à-vis de la tolérance neurologique à l'hyperoxie.

La toxicité pulmonaire de l'oxygène dépend à la fois de la pression en oxygène et de la durée d'exposition. Ce ne semble pas être un risque important pour les protocoles de RTI ( $PiO_2$  à 1,9 ATA pendant au maximum trois heures). C'est pourquoi la plupart des protocoles ne proposent pas l'utilisation de l'oxygène en mode séquentiel c'est-à-dire avec des pauses courtes de respiration d'air entre les périodes d'oxygène comme réalisées pour les tables longues d'oxygénothérapie hyperbare.

### 5. Protocole mis en œuvre à Clipperton

#### 5.1. Description de la mission

Une expédition scientifique de quatre mois sur l'atoll de Clipperton, îlot désertique situé à 1 300 km au large des côtes mexicaines, a été organisée en début d'année 2005 par le doc-

teur Jean-Louis Étienne. L'objectif était de dresser un inventaire exhaustif de cet écosystème singulier de 12 kilomètres de circonférence, habité par des milliers d'oiseaux et des millions de crabes. Le travail a consisté à actualiser et à approfondir les connaissances sur la vie hébergée par Clipperton avec en particulier un important programme d'exploration sous-marine en mer mais aussi dans le mystérieux lagon entièrement fermé qui caractérise cet atoll. Les conditions d'isolement étaient sévères, l'accès à l'île n'étant possible qu'après une traversée en mer de trois jours avec un débarquement périlleux sur embarcation pneumatique à travers une passe étroite dans les brisants. Par ailleurs des phénomènes complexes de marée rendaient l'unique passe inaccessible à marée basse pendant de nombreuses heures voire des jours entiers. Des plongées scientifiques quotidiennes ont été organisées jusqu'à la profondeur maximale de 60 m à l'air et également en recycleur avec des appareils à  $PiO_2$  régulée. L'environnement sous-marin était réputé agressif en raison de bancs de requins omniprésents observés il y a quelques années ; victimes de pêches intensives, ces derniers se sont montrés en fait fort discrets. En surface sévissait une forte houle océanique nettement ressentie par faible profondeur, entraînant une station aux paliers de décompression difficile. Les plongées dans le lagon étaient également particulières en raison d'une visibilité presque nulle et de l'émanation, à partir de la profondeur de 13 m, d'hydrogène sulfuré issu de la décomposition de la matière organique.

La recherche d'un centre hyperbare vers le Mexique, l'archipel des Galapagos ou même San Diego aux États-Unis, et surtout d'un moyen d'évacuation, ont été nos premières préoccupations. Mais très vite il est apparu évident que le délai d'accès serait supérieur à 24 heures. L'achat ou la location d'un caisson de transport ont aussi été envisagés mais écartés essentiellement en raison du coût [20]. Ne restaient donc pour gérer l'accident de décompression que des moyens de prévention et la réimmersion thérapeutique. Cette dernière semblait tout à fait indiquée pour plusieurs raisons : disponibilité d'importantes capacités d'oxygène, température de la mer et du lagon à 29 °C (limitant le risque d'hypothermie) et par ailleurs possibilité de disposer d'un lieu abrité dans le lagon.

#### 5.2. Protocole

L'oxygénation normobare d'au moins dix minutes en surface semble un point essentiel car elle permet parfois la résolution des signes cliniques. Cette période de dix minutes permet également d'organiser correctement le chantier, de décider de son lieu d'application selon les conditions d'environnement, et surtout d'évaluer précisément l'indication de réimmersion.

L'étude des protocoles existants de RTI montre clairement qu'un risque a été sous-estimé : celui de la majoration de la déshydratation d'autant plus importante que la durée d'immersion est longue. Cette déshydratation pourrait contribuer à une évolution défavorable de la MDD. Or, la plupart des protocoles prévoient des durées de deux à trois heures. Par ailleurs le niveau de  $PiO_2$  de 1,9 ATA expose malgré tout à un risque de crise hyperoxique, risque qui est également relié à la durée

d'exposition. Pour toutes ces raisons nous avons opté d'emblée pour une réimmersion de courte durée limitée à une heure et neuf minutes au maximum avec un seul palier à la profondeur de neuf mètres (PiO<sub>2</sub> à 1,9 ATA) suivi d'une remontée à la vitesse d'un mètre par minute (Fig. 5). L'oxygène pur est délivré pendant toute la durée du traitement. La toxicité pulmonaire n'est pas redoutée pour des durées d'exposition faible. L'utilisation du mode séquentiel pourrait avoir un effet irritatif favorisant la toxicité aiguë neurologique par fluctuations répétées sur la vasoconstriction cérébrale liée à l'O<sub>2</sub> [21].

Les procédures avec incursions profondes à 50 m ont d'emblée été écartées car jugées dangereuses en raison des risques précédemment cités (narcose et charge en azote).

Pour les plongeurs équipés d'un recycleur délivrant une PiO<sub>2</sub> régulée (PiO<sub>2</sub> proche de 1,4 ATA), nous avons développé un protocole de réimmersion spécifique réalisant une incursion unique à 30 m pendant dix minutes suivie d'un palier à neuf mètres pour une durée totale également d'une heure et neuf minutes (Fig. 6). L'intérêt du recycleur est de permettre une incursion à 30 m (effet mécanique sur les bulles) en maintenant une PiO<sub>2</sub> à 1,4 ATA pendant cette phase ce qui limite la saturation supplémentaire en gaz diluant en gardant l'avantage d'un risque hyperoxique moindre. Cependant lors de la remontée, le plongeur doit se débrancher du recycleur pour respirer à partir du dispositif à paliers permettant de disposer d'une PiO<sub>2</sub> à 1,9 ATA à la profondeur de 9 m.

### 5.3. Mise en œuvre

Toutes les plongées sont réalisées à partir d'embarcations pneumatiques disposant d'une bouteille d'oxygène de 50 l avec la possibilité de mise en œuvre d'oxygène pur au palier de neuf mètres pour le protocole de réimmersion. Il s'agit d'un « ensemble à paliers » traditionnel avec plusieurs détendeurs disponibles délivrant de l'oxygène pur ; ces derniers sont équipés de sangle d'embout buccal pour éviter la perte du détendeur en cas de troubles de conscience. À bord de l'embarcation, un bloc de bouteilles d'air de secours est toujours disponible pour le plongeur d'assistance. Une ligne à paliers, marquée tous les mètres, et une ligne de vie avec un harnais pour raccorder l'accidenté à la surface sont parés. Le plongeur d'assistance est muni d'une planchette immergeable pour communiquer par écrit avec l'accidenté et la surface.

Dès la déclaration des symptômes, le patient respire de l'oxygène normobare avec un masque à haute concentration et un débit d'au moins 15 l par minute. Un traitement médicamenteux, similaire au protocole de la Marine française, est immédiatement administré per os. Il comprend 250 mg d'aspirine, 400 mg de pentoxyfylline LP, 300 mg de buflomédil et 80 mg de prednisolone, ainsi qu'une hydratation de 250 ml d'eau plate. Un traitement symptomatique est injecté en cas de vertiges (500 mg IVD d'acétyl-dl-leucine).

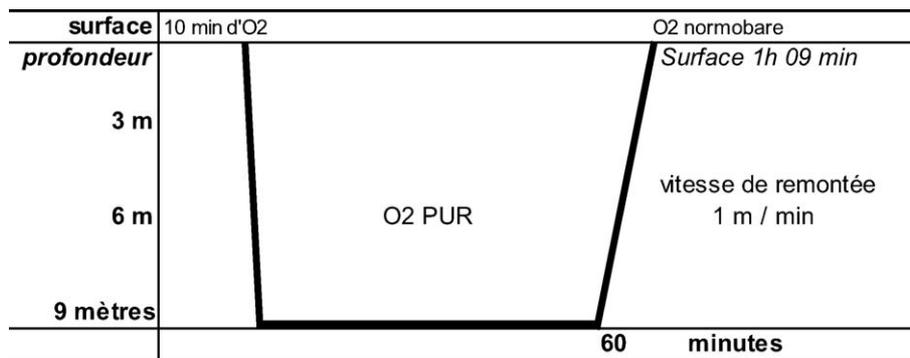


Fig. 5. Méthode « Clipperton » de recompression thérapeutique par immersion avec un palier d'une heure à neuf mètres sous oxygène pur.

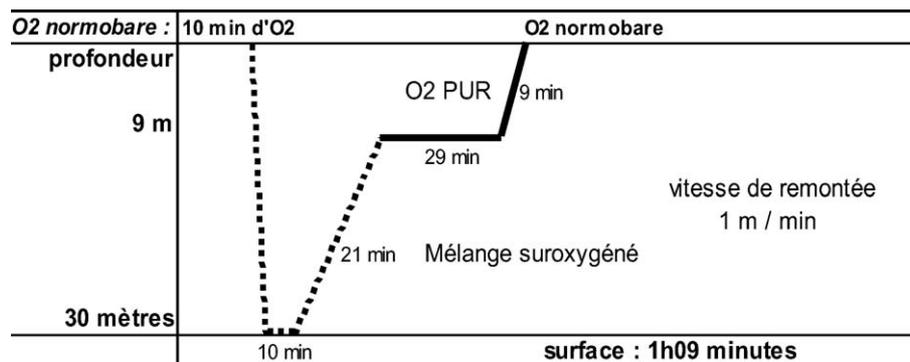


Fig. 6. Méthode « Clipperton-bis » de recompression thérapeutique par immersion pour recycleur avec incursion à 30 m suivie d'un palier à 9 m sous oxygène pur.

Pendant ce temps l'alerte est donnée avec rappel de tous les plongeurs disponibles et le chef des opérations de plongée décide du lieu de la réimmersion selon les conditions d'environnements : réimmersion en mer (si la marée et la houle l'autorisent) ou dans le lagon.

Le médecin vérifie l'absence de contre-indication de la RTI. Il vérifie notamment l'absence de troubles de conscience, d'état convulsif, de vertiges associés à des vomissements permanents, l'absence de détresse respiratoire et de pneumothorax. Le médecin donne son acceptation pour débiter la réimmersion si malgré la prise en charge initiale, les symptômes persistent. Les indications de la RTI concernent :

- les accidents de désaturation de type ostéoarticulaire, cochléovestibulaire (à condition que les vertiges aient été médicalement calmés) et neurologique ;
- les barotraumatismes pulmonaires compliqués d'un aéroembolisme cérébral, en présence de signes neurologiques isolés (sans convulsions ni troubles de conscience) et sans détresse respiratoire ni suspicion de pneumothorax.

À la sortie de l'eau, le patient est pris en charge médicalement : oxygène normobare à un débit de 10 l/min pendant six heures, mise en place d'une voie veineuse périphérique de bon calibre. Une réhydratation veineuse est réalisée préférentiellement par hydroxyéthylamidon avec un remplissage de 500 ml en 30 minutes, suivi de 500 ml de sérum salé isotonique en plusieurs heures associé à nouveau à des vasodilatateurs. En cas de signe déficitaire neurologique persistant, la lidocaïne (1 mg/kg) est ajoutée à cette perfusion. Si le moyen d'évacuation n'est pas disponible avant plusieurs jours, le protocole de réimmersion peut être répété deux fois par jour matin et soir jusqu'à l'arrivée des secours.

Toute cette procédure a été mise en œuvre pour exercice à Clipperton, mais n'a heureusement pas été réalisée sur un plongeur accidenté.

#### 5.4. Intérêt du protocole proposé

Aucune des procédures proposées de RTI n'a à ce jour été validée, que cela soit par des travaux expérimentaux ou bien par des études épidémiologiques des accidents traités par cette méthode. Nous avons vu que le recueil de la littérature était assez pauvre dans ce domaine et concernait rarement des méthodes de RTI publiées. Les différences entre les protocoles se fondent donc sur des considérations en rapport avec la physiopathologie des accidents de désaturation et la limitation des risques. La proposition d'un nouveau protocole de plus courte durée correspond à cette démarche de limitation globale des risques de déshydratation, d'hyperoxie et d'hypothermie. Cependant, des travaux expérimentaux sur un modèle animal sont indispensables pour la validation de ces protocoles.

Une étude norvégienne récente a montré l'efficacité partielle de la recompression en caisson à la profondeur équivalente de six mètres pendant une heure pour des cochons présentant des ADD neurologiques sévères [22]. Ce type de traitement permet

de réduire le nombre de décès et la gravité de l'atteinte clinique par rapport au groupe témoin. Mais si les bulles circulantes observées au niveau de l'artère pulmonaire sont parfaitement neutralisées par ce traitement, la fonction endothéliale reste perturbée, et l'étude anatomopathologique montre la présence de lésions œdémateuses, cérébrales et médullaires pour tous les animaux. Le protocole de cette étude est proche de la méthode de RTI proposée dans le cadre de la mission Clipperton. L'efficacité relative du traitement est probablement en rapport avec le modèle d'ADD très sévère choisi dans l'étude. L'atteinte mixte de la moelle épinière et du cerveau et la mort rapide de l'animal ne correspondent pas aux tableaux cliniques d'accident de désaturation habituellement rencontrés chez les plongeurs.

Des travaux expérimentaux de ce type mais en immersion et avec des modèles d'ADD moins sévères méritent d'être poursuivis.

## 6. Conclusion

La recompression thérapeutique par immersion peut être, en l'absence de caisson de recompression, le seul traitement efficace permettant de traiter précocement un accident de désaturation. Cependant cette pratique, qui n'est pas encore validée, présente de nombreux dangers et ne peut s'envisager qu'en présence d'un matériel spécifique comprenant de l'oxygène pur, d'un protocole précis et d'un entraînement préalable. Les risques d'hypothermie, de déshydratation et d'hyperoxie plaident pour une réimmersion courte et à faible profondeur.

La réimmersion thérapeutique peut aussi représenter un premier traitement, en attendant l'évacuation secondaire vers un centre hyperbare. Son usage pourrait être élargi aux très nombreuses situations où l'évacuation vers un caisson est de l'ordre de plusieurs heures. Dans les années à venir, le développement des caissons légers et transportables disponibles sur les sites de plongée permettra probablement d'optimiser le traitement des accidents de décompression et ainsi de supplanter les procédures de réimmersion ; actuellement, leur coût, leur gestion et leurs risques spécifiques en limitent l'usage.

## Remerciements

Nous tenons à remercier le Pr E. Cantais pour son aide lors de la préparation de ce manuscrit.

## Références

- [1] Farm Jr. FP, Hayashi EM, Beckman EL. Diving and decompression sickness treatment practices among Hawaii's diving fishermen. Sea Grant Technical Paper UNIH-SEAGRANT-TP-86-01. Honolulu, HI: University of Hawaii Sea Grant College Program; 1986.
- [2] Edmonds C. In-Water Oxygen Recompression: a potential field treatment option for technical divers. *Aquacorps* 1993;5:46–9.
- [3] Pyle RL. Keeping up with the times: application of technical diving practices for in-water recompression. In: Kay E, Spencer MP, editors. *In-Water Recompression: the 48<sup>th</sup> workshop of the Undersea and*

- Hyperbaric Medical Society. Kensington: UHMS Publication Number RC103.C3; 1999. p. 74–88.
- [4] Navy US, Navy Diving Manual US. Volume 1, Air Diving (NAVSEA 0994-LP-001-9010). Washington, DC, US: Government Printing Office; 1985.
- [5] Pyle RL, Youngblood D. In water recompression as an emergency field treatment of decompression illness. *SPUMS J* 1997;27:154–69.
- [6] Francis TJ, Pearson RR, Robertson AG, Hodgson M, Dutka AJ, Flynn ET. Central nervous system decompression sickness: latency of 1070 human cases. *Undersea Biomed Res* 1988;15:403–17.
- [7] Rivera JC. Decompression sickness among divers: an analysis of 935 cases. Washington, DC AD: Research Report 1-63 (400-368): Experimental Diving Unit; 1963.
- [8] Divers Alert Network. Report on 1987 diving accidents. Durham, North Carolina: Divers Alert Network; 1988.
- [9] Méliet JL, Mayan PY. Le pronostic des accidents de décompression dans la Marine nationale influence du délai d'apparition et du délai de recompression. *Bull Med Sub Hyp* 1990;9(Suppl):63–5.
- [10] Blatteau JE, Guigues JM, Hugon M, Galland F-M, Sainty JM, Menu JP. Plongée à l'air avec la table de décompression MN90. Bilan de 12 années d'utilisation par la Marine française : à propos de 61 accidents de désaturation de 1990 à 2002. *Sci Sports* 2005;20:119–23.
- [11] Knight J. In-water oxygen recompressing therapy for decompression sickness. *SPUMS J* 1984;14:32–4.
- [12] Edmonds C, Lowry C, Pennefather J. *Diving and subaquatic medicine*, 3rd edition. London Butterworths; 1991.
- [13] Méliet JL. Aspects microcirculatoires de la maladie de décompression. *Bull Med Sub Hyp* 1999;9(Suppl):51–9.
- [14] Melin B, Jimenez C, Clerc N, Mathieu J, Aguilon P, Alonso A, et al. Immersion de longue durée. Étude des conséquences sur l'homéostasie hydrominérale et énergétique. In: Buffe P, Menu JP, editors. *Compte-rendu final de l'opération « immersion de longue durée »*. Rapport de recherche n°05-06 IMNSSA, Toulon; 2005: 93–137.
- [15] Sullivan P, Vrana A. Trial of in-water oxygen recompression therapy in Antarctica. *SPUMS* 1992;22:46–51.
- [16] Robinet C, Galland F-M, Hugon M, Desruelle AV, Jammes Y, Leiffen D, et al. Prolonged total body immersion in cold water experimentation. In: Desola J, editor. *Proceedings of the 31st annual meeting of the EUBS*, Barcelona; 2005 : 136.
- [17] Blatteau JE, Guigues JM, Remy FX, Hugon M, Robinet C, Galland FM. Plongées avec recycleurs. Expérience de la Marine nationale depuis 20 ans. À propos de 96 accidents répertoriés. *Bull Med Sub Hyp* 2003;13(Suppl):77–85.
- [18] Moon RE, Sheffield PJ. Guidelines for treatment of decompression illness. *Aviat Space Environ Med* 1997;68:234–43.
- [19] Louge P, Méliet J-L. Toxicité de l'oxygène hyperbare sur le système nerveux. In: Wattel F, Mathieu D, editors. *Traité de médecine hyperbare*. Paris: Ellipses Éditions Marketing; 2002. p. 627–32.
- [20] Melamed Y, Shearman D, Wiler-Ravell D, Kerem D. The transportable recompression chamber as an alternative to delayed treatment in serious diving accidents. *Aviat Space Environ Med* 1981;52:480–4.
- [21] Cantais E, Louge P, Goutorbe P, Méliet JL. Flow velocity changes in the cerebral arteries during a long period of oxygen breathing. In: Calicorleo R, editor. *Proceedings of the 26th EUBS annual meeting*, Malta 2000 : 111–6.
- [22] Mollerlokken A, Hovin W, Nossum V, Gennser M, Brubakk A. Recompression with oxygen to 160 kPa eliminates vascular gas bubbles in the pulmonary artery, but does not prevent injury to the endothelium and the CNS. In: Desola J, editor. *Proceedings of the 31st annual meeting of the EUBS*, Barcelona; 2005: 86.